

경수중에서 지르칼로이-4 튜브의 프레팅 마멸특성

Fretting Wear Characteristics of Zircaloy-4 Tube in Light Water

조광희^{*}, 노규철^{*}, 김석삼^{**}, 조성재^{***}

* 경북대학교 기계공학과 대학원

** 경북대학교 기계공학부

*** 한국표준과학연구원 소재특성평가센터

Abstract

The fretting wear characteristics of Zircaloy-4 tube in light water were investigated experimentally. A fretting wear tester was designed to be suitable for this fretting test. This study was focused on the effects due to the combination of normal load, slip amplitude and number of cycles as the main factors of fretting. The results of this study showed that the wear volume increased abruptly at slip amplitude above $100\mu\text{m}$, which is defined as critical slip amplitude of Zircaloy-4 tube in light water, and that under $160\mu\text{m}$ the wear volume decreased as load increased at the same slip amplitude.

Keyword : Fretting, Zircaloy-4 tube, Stick, Wear volume

1. 서론

원자력발전소(원전)의 증기발생기, 원자로 제어봉 집합체, 원전 연료봉 집합체 등이 운전중에 안전성이 유지되도록 설계되었으나 제작, 조립, 운반, 또는 운전과정 등에서 뜻하지 않은 조립간격의 증대, 기계적 성질의 변화 등으로 유체흐름에 의한 튜브진동이 발생되고, 튜브와 지지격자 사이의 마찰로 튜브 또는 봉에 결함이 발생한 사례가 국내, 외 운전중인 원전에서 발생되고 있어 이에 관한 연구가 근래 활발하게 이루어지고 있으며 결함원인이 대부분 유속에 의한 프레팅 마멸로 알려져 있다. 따라서 우리나라 가압경수형 원전의 연료봉 피복재로 사용되는 지르칼로이-4 튜브의 공기중에서의 프레팅 마멸특

성은 실험을 통하여 작은 진폭에서는 하중의 증가에도 마멸량이 거의 발생되지 않지만 일정한 미끄럼거리 이상에서는 접촉하중의 증가에 따라 급격히 증가하는 임계진폭이 존재함을 이미 발표한 바 있다[1].

지금까지 프레팅에 대한 연구가 많이 발표되고 있지만 프레팅에 대한 정의가 정량적이지 못하고 단지 “작은 진폭을 갖는 반복운동에 의해 발생하는 마멸손상”으로 되어 있어 연구자에 따라 “작은 진폭”에 대한 수치적 이해의 차이로 때로는 상반된 연구 결과들이 발표되기도 했다.

Iwabuchi[2]는 이 작은 진폭을 접촉면적의 크기에 상당하는 것이라고 생각하였으며, 마멸이 발생하기 위해서는 어느 정도 이상의 진폭이 필요하며 이 진폭을 임계

진폭이라 했다. 또한 이 임계진폭 이상에서는 마멸량은 진폭에 직선적으로 비례하며 이 임계진폭이 탄소강에서는 약 50 μ m 이라고 보고하였다. Halliday등[3]은 연강 봉으로 10⁶cycles까지 실험한 결과 마멸량이 급격히 증가하는 임계진폭이 약 100 μ m에 나타났다고 발표했다. 또한 하중이 프레팅 마멸에 미치는 영향에 대해 Feng 등[4]은 하중과 마멸량은 비례관계, Uhlig 등[5]은 하중의 증가는 상대 미끄러움을 억제하게 되어 마멸이 감소하게 된다고 각각 보고하고 있다.

유체흐름에 의한 핵연료봉의 움직임은 impact, 반복 sliding 또는 이 운동들의 결합으로 구성될 수 있다. 그러나, Ko[6]는 Zirconium alloy를 이용한 프레팅 실험에서 impact motion에 의한 마멸량은 sliding motion에 의한 것 보다 매우 적었음을 발표했었다.

따라서 본 연구에서는 진폭이 무단으로 조절되고 반복 sliding 운동을 하는 fretting시험기를 설계, 제작하여 원전 연료봉 피복재로 사용되고 있는 지르칼로이-4 튜브를 시편으로 경수중에서 프레팅마멸 실험을 실시하여 지르칼로이-4 튜브의 경수중 프레팅마멸 임계진폭을 조사하고 임계진폭 전, 후에서의 하중/진폭과 마멸량 관계 및 비마멸을 관계를 상세히 파악하고 stick, partial slip, gross slip 및 slip 구간을 밝히는 fretting map을 작성하고자 한다.

2. 실험

2-1 실험장치

본 실험에 사용된 실험장치는 Fig. 1과 같이 모타축에 취부된 편심 플렌지의 편

심조정볼트를 회전시켜 필요한 편심량을 설정할 수 있도록 설계, 제작 되었다. 이동시편은 진동 전달보에 의해 편심 플렌지에 설정된 편심량의 1/10진폭으로 경수중에서 왕복운동을 하게된다. 두 시편의 접촉하중은 Screw식 이송대로 고정시편을 압착하게 되어있고 load cell(0-20kgf)과 고정시편 사이에는 coil spring을 설치하여 가압시 시편에 충격이 일어나지 않도록 하였으며 시편접촉부의 마멸에 의한 간격 발생시 계속 하중을 가할 수 있도록 하였다. 이동시편의 진직한 선형 왕복운동을 얻기 위해 이동시편 고정지그에 LM guide를 설치하였다. 구동모터(0.75kw)의 회전수는 인버터(inverter)를 이용하여 인가되는 AC주파수를 무단으로 조정함으로써 조절하도록 하였다. 물에 닿는 시편고정 지그는 니켈도금 하였다.

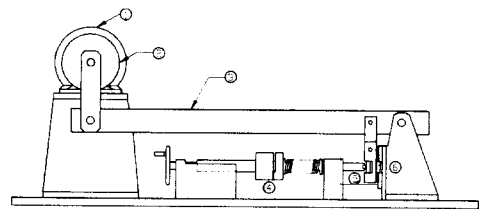


Fig. 1 Schematic diagram of fretting wear tester

- | | |
|------------------|-------------------|
| ① Motor | ② Eccentric plate |
| ③ Vibrating beam | ④ Load cell |
| ⑤ Water box | ⑥ Specimens |

2.2 시험편

원자력발전소 핵연료봉은 11곳이 지지격자로 지지되고 있다. 그중 바닥에 있는 지지격자(Inconel)외에는 지지격자의 재질이 모두 피복재와 동일한 지르칼로이-4 재질이므로 본 실험에 사용된 고정 및 이동시편은 외경 9.7mm의 지르칼로이-4

튜브(두께 1.3mm)이며 가공전에 육안으로 검사하여 결함이 없는 봉으로 선별하고, 수직(이동)시편 32mm, 수평(고정)시편 28mm로 절단하고, 아세톤 용액에서 10분간 초음파 세척을 하고 공기 건조기로 건조시켜 사용하였다. 실험전에 표면 거칠기로 임의의 표면을 5mm 정도 측정된 결과 R_a 값이 $2\mu\text{m}$ 로 나타났다. 사용한 시편의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of Zircaloy-4

Chemical element	Sn	Fe	Cr	C	O	Zr
Composition (wt%)	1.25	0.21	0.11	0.00153	0.134	balance
Mechanical properties	Room temperature			399 °C		
	UTS (MPa)		696		365	
	0.2%YS (MPa)		517		296	
	Elongation 5.00(cm)		24		32	

2.3 실험조건

실험은 두 개의 지르칼로이-4 튜브를 경수중에서 직각으로 접촉시키고 접촉력을 20N, 40N, 60N, 80N 및 100N 까지 5단계로, 진폭은 $40\mu\text{m}$, $70\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$, $130\mu\text{m}$, $160\mu\text{m}$, $200\mu\text{m}$, $300\mu\text{m}$, 및 $400\mu\text{m}$, 진동수는 1×10^5 cycles, 3×10^5 cycles 및 5×10^5 cycles의 3가지 경우로 실험하였다.

시험편의 왕복 미끄럼 진동수는 1초당 10회로 고정하였고, 실험에 사용한 경수는 증유수로 시편 교체시 매번 교체하였다. 진폭은 편심조정 플랜지에 편심량을 설정하고 시편에 하중을 설정한 후 이동시편

의 실제진폭을 확인하였다.

3. 실험결과와 고찰

3.1 진폭, 하중 증가에 대한 마멸량의 변화

지금까지 발표된 연구 결과에 의하면 미소진폭 즉, 임계진폭 이하에서는 마멸이 일어나지 않았다고 판단하였거나[2], 또는 미미하므로 무시하고 임계진폭 이상에서 진폭 또는 하중이 증가하면 마멸량이 증가하는 것으로 보고되고 있다.

본 연구에서는 프레팅의 정의가 미소진폭에 관한 현상이고 원전연료 집합체 설계시 예상 진동진폭을 약 $100\mu\text{m}$ 로 가정하고 있어[11] $100\mu\text{m}$ 를 기준으로 상, 하 $30\mu\text{m}$ 간격으로 진폭을 변화시키면서 마멸 현상을 분석해서 Fig. 2와 같은 결과를 얻었다.

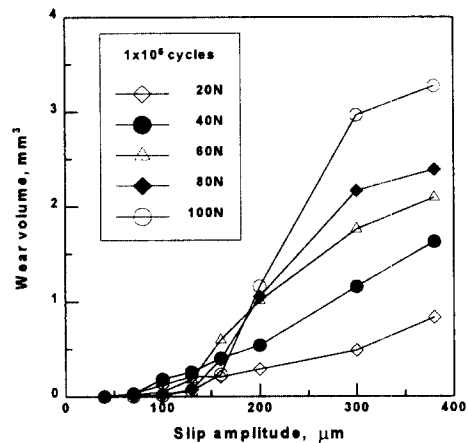


Fig. 2 Wear volume as a function of slip amplitude in light water at 10^5 cycles

지르칼로이-4 튜브를 하중과 진폭을 변화시키면서 프레팅마멸 실험을 경수중에서 진동수 1×10^5 cycles, 3×10^5 cycles 및 5×10^5 cycles의 3가지 경우로 실시한 결

과 전 진폭 구간에서 진폭이 증가하면 마멸량이 증가하였다. Fig. 2는 1×10^5 cycles에서 실험한 경우로 진폭 $100\mu\text{m}$ (임계 진폭) 미만에서는 마멸량이 매우 적었지만 $200\mu\text{m}$ 부터는 거의 직선적으로 비례 증가하였으며 $100\mu\text{m}$ 와 $200\mu\text{m}$ 사이 구간 진폭에서는 마멸량의 변화가 심하게 나타났다. 따라서 변화가 많은 이 구간에서 진폭의 증가와 마멸량의 변화를 상세히 알아보기 위해 추가로 진폭 $130\mu\text{m}$ 와 $160\mu\text{m}$ 에서 프레팅마멸 실험을 실시 하였다.

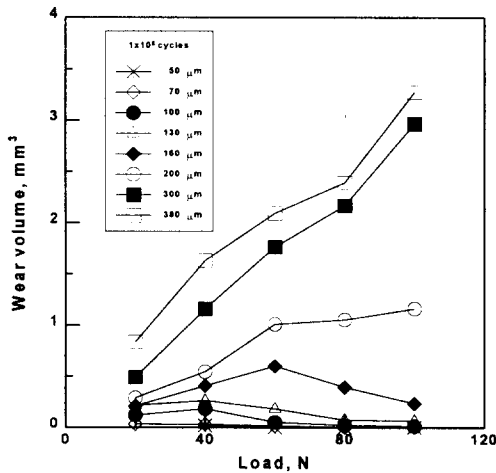


Fig. 3 Wear volume as a function of load in light water at 10^5 cycles

마멸량과 하중의 관계를 더 명확히 하기 위해 Fig. 3을 보면, 진폭이 $200\mu\text{m}$ 이상에서는 하중증가와 더불어 마멸량이 서서히 증가하고 있지만 $160\mu\text{m}$ 이하에서는 하중이 증가할수록 마멸량은 감소하여 100N 에서는 거의 무시할 수 있을 정도이다. Fig. 3은 진폭 $50\mu\text{m}$ 는 60N 에서, $70\mu\text{m}$ 는 80N 에서, $100\mu\text{m}$ 는 100N 에서 마멸이 거의 발생되지 않음을 보여주고 있다.

그러나 진폭 $130\mu\text{m}$ 와 $160\mu\text{m}$ 의 경우 100N

에서도 소량의 마멸량이 측정되어 하중 120N , 140N 까지 추가로 실험을 실시한 결과 마멸량은 계속 감소하여 진폭 $130\mu\text{m}$ 는 120N 에서, 진폭 $160\mu\text{m}$ 는 140N 에서 마멸량이 거의 보이지 않게 되었다. 또한 지금까지 연구 보고된 내용들이 상반된 경우는 이와 같이 진폭의 범위에 따라 일어나는 상반된 현상을 부분적으로 연구한 것에 기인한 것으로 생각된다.

3.2 진동수 증가에 대한 마멸량의 변화

경수중에서 프레팅마멸 실험에 의한 마멸량의 변화는 공기 중에서 실험한 경우와 같이 진동수가 증가하면 증가율에 차이는 있었으나 진폭과 하중에 관계없이 증가하였다. 또한 진폭이 증가하면 진동수 증가에 따른 마멸량의 증가폭이 커지고 있다. 이는 전체 미끄럼거리의 증가와 진폭증가에 따른 비마멸율의 증가에 기인한다.[12]

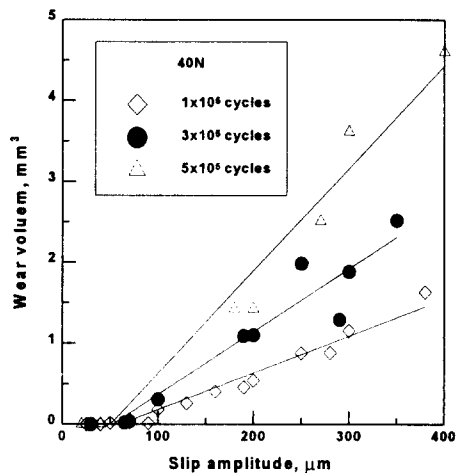


Fig. 4 Wear volume as a function of slip amplitude for each cycles at 40N

Fig. 4에서 나타난 바와 같이 동일한 하

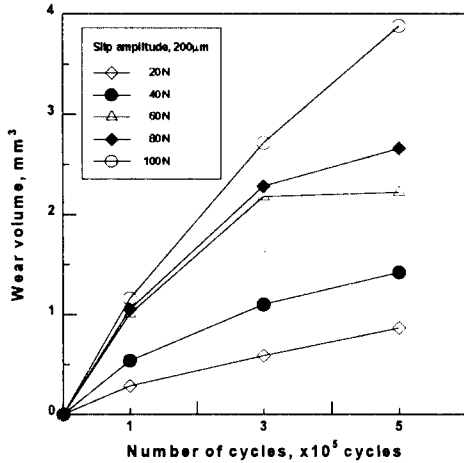


Fig. 5 Wear volume as a function of number of cycles at 200µm slip amplitude

중 40N에서 진동수가 증가할수록 마멸량은 모든 진폭(미소진폭 범위 포함)에서 증가한다. 그러나 진폭이 70µm보다 큰 경우는 진동수 증가에 따라 마멸량이 크게 증가하지만 70µm이하에서는 진동수가 증가하여도 마멸량의 변화는 매우 작다.

Fig. 5는 경수 중에서 진폭 200µm로 실험한 경우로 진동수 증가에 따라 마멸량이 거의 비례하여 증가함을 보여주고 있다.

3.3 진폭, 하중 증가에 따른 마멸단면의 변화

진폭이 작을수록, 하중이 클수록 마멸깊이와 마멸량은 적어지고 있다. Fig. 6에서 보면 진폭 70µm 이하에서 이동시편은 적게나마 마멸현상이 나타나는데 비해 고정시편은 대부분 마멸이 발생되지 않았고 프레팅마멸 실험을 하기 전보다 오히려 높게 측정되었다. 이들 마멸량이 0이 되는 조건의 시편들의 마멸단면을 Fig. 6에서 보면 모두 stick 현상이 있었음을 알 수

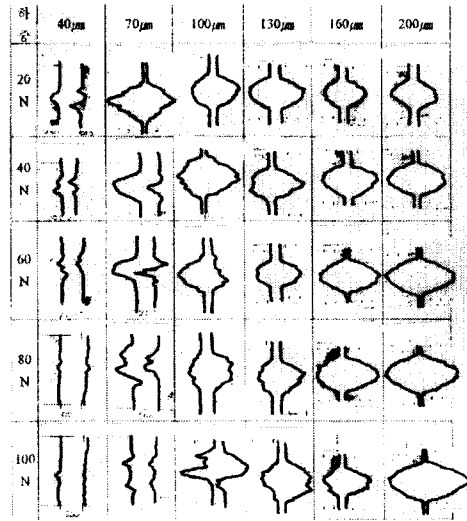


Fig. 6 The profile curve of Zircaloy-4 tube worn in light water

있다. stick현상은 진폭이 작을수록 작은 하중에서 발생되고 진폭이 클수록 stick현상으로 접근시키는 하중이 커지게 된다. 이로써 동일 미소진폭에서 하중이 클수록 마멸량이 감소한 원인이 stick 현상에 있음을 알 수 있다.

진폭 100µm부터 160µm까지는 수직, 수평 시편 모두 진폭증가에 따라 마멸깊이와 마멸량이 증가하였지만 동일진폭에서 하중이 증가되면 마멸단면의 중심부가 예각에서 점점 넓어지며 마멸되지 않은 고원이 마멸단면 중심부에 생성되면서 마멸깊이와 마멸량이 감소하게 된다.

그러나 일정진폭(200µm) 이상에서는 하중이 증가할수록 마멸량은 늘어나므로 stick 현상이 발생되지 않는다. 그러므로 진폭 200µm는 모든 하중에서 gross slip 현상이 시작되는 진폭이라고 할 수 있다.

3.4 진폭, 하중 증가에 대한 비마멸율의 변화

비마멸율은 마멸량을 하중과 미끄럼거리로 나눈 값으로써 구해지며, 마멸특성을 이해하기 위해 종종 사용된다.[9] Fig. 7은 10^5 cycles 동안 프레팅마멸 실험 후 진폭의 변화에 대한 이동시편의 비마멸율의 변화를 나타내고 있다. 진폭의 증가에 따라 비마멸율이 증가하고 있으나, 진폭 $200\mu\text{m}$ 이하에서는 비마멸율의 변화가 매우 심하고, 진폭 $200\mu\text{m}$ 이상에서는 비마멸율이 진폭 증가에 따라 서서히 증가하고 있다.

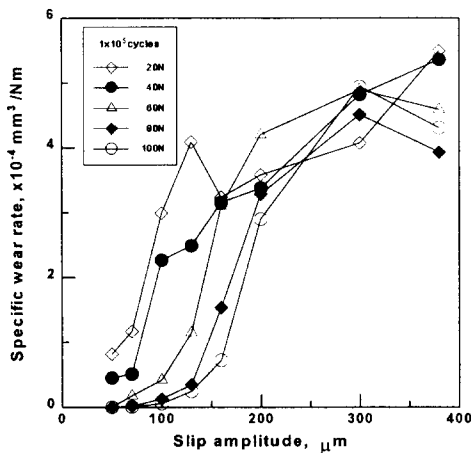


Fig. 7 Specific wear rate of moving specimen at 10^5 cycles

하중별로 보면 20N과 40N의 경우는 $75\text{--}100\mu\text{m}$ 구간에서, 60N과 80N의 경우는 $130\text{--}160\mu\text{m}$ 구간에서, 100N은 $160\text{--}200\mu\text{m}$ 구간에서 비마멸율이 급격히 증가하였다. 비마멸율이 급격히 증가하는 이 구간은 접촉면의 중심에 stick된 부위가 있던 partial slip 단계를 지나 마멸량이 급격히 증가하는 gross slip 단계에 해당된다. 그러나 진폭 증가에 따라 gross slip이 slip 현상으로 발전되며 Fig. 7에서와 같이 비마멸율은 진폭 증가에 대해 완만하게 증가하고 있다.

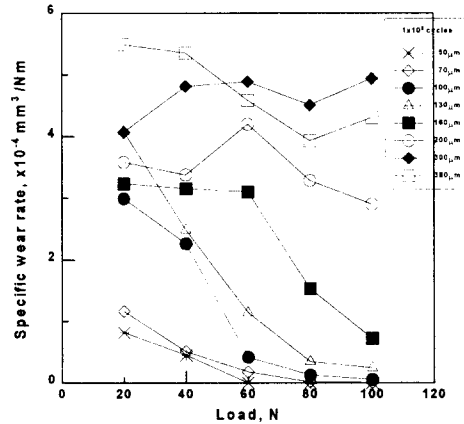


Fig. 8 Specific wear rate of moving specimen at 10^5 cycles

Fig. 8은 하중증가와 비마멸율의 변화를 나타내고 있다. 진폭이 $200\mu\text{m}$ 미만인 경우 하중이 20N이면 $200\mu\text{m}$ 이상 진폭의 경우와 같이 높은 비마멸율을 나타내지만, 하중이 증가할수록 비마멸율이 급격히 감소하여 약 100N에서는 0에 가깝게 된다. 진폭 $70\mu\text{m}$ 와 $50\mu\text{m}$ 의 경우는 하중이 20N인 경우에도 비마멸율이 매우 작다.

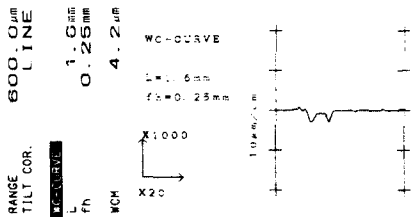
진폭 $200\mu\text{m}$ 이상에서도 하중의 증가에 따라 비마멸율이 감소하고 있으나 그 변화 폭이 작아 거의 일정하다고 볼 수 있다. 이는 진폭 $200\mu\text{m}$ 이상에서는 gross slip이 끝나고 마멸율이 일정한 slip 단계임을 나타낸다.

3.5 마멸면의 미시적 관찰

마멸면의 미시적 형상을 조사하기 위해 SEM을 사용했다. Fig. 9 (a)는 10^5 cycles 동안 접촉하중 40N, 진폭 $70\mu\text{m}$ 로 프레팅 마멸실험을 수행후 이동시편의 마멸면을 SEM으로 촬영한 것이다. 가장자리의 검은 링 형상의 마멸면은 가운데의 조금 밝은 부분보다 훨씬 가혹하게 마모되었음을



(a)



(b)

Fig. 9 (a)SEM photograph showing partial slip
(b)Profile curve of the worn surface
(70 μ m, 40N, 1*10⁵cycles)

뜻한다. 이는 접촉영역 모두에서 마모가 동일하게 일어나지 않음을 말하는데, 그것은 가운데 부분에서 stick이 발생했음을 뜻한다.

Fig. 9 (b)는 표면 거칠기 측정한 (a)의 단면형상을 보여주고 있는데, stick영역과 slip영역의 구분을 잘 나타내고 있다. 점점 축임을 고려해 볼 때 가장 깊은 마멸면은 중심이어야 하지만, 중심부분에서 stick이 발생했기 때문에 가장자리 부분에서 더 많은 마모가 발생해서 가장자리 부분이 더 깊게 된다. 전형적인 partial slip 영역의 형상을 잘 보여 주고 있다.

3.6 Stick, partial slip, gross slip, slip의 관계 (Fretting Map)

경수중에서 10⁵cycles동안 실시한 프레팅마멸 실험 결과 얻은 마멸량의 변화를 분석해 보면, 마멸량이 거의 발생되지 않는 stick 현상이 하중 60N일 때는 50 μ m이하에서, 80N일 때는 70 μ m이하에서, 100N일 때는 100 μ m이하에서 발생되고 있다. 마멸량이 조금씩 발생하기 시작하는 partial slip 현상[13]은 하중이 20N일 때는 50 μ m, 40N일 때는 70 μ m, 60N일 때는 100 μ m, 80N일 때는 130 μ m, 100N일 때는 160 μ m까지 나타나고 있다. 마멸량이 급격히 증가되는 gross slip 현상은 하중이 20N, 40N, 60N, 80N, 100N일 때 각각 100 μ m, 100 μ m, 160 μ m, 200 μ m, 200 μ m까지 나타나고 있으며, 그 이상에서는 마멸량은 많이 발생되나 비마멸율이 마멸 증가에 따라 조금씩 증가하는 slip 현상이 나타나고 있다.

이러한 하중과 진폭의 관계를 그림으로 나타내면 Fig. 10과 같은 fretting map이 그려진다. Fig. 10에서 보면 동일 하중에서는 진폭이 증가할수록 slip 영역에 가까워지고, 동일 진폭에서는 하중이 증가할수록 stick 영역에 가까워짐을 알 수가 있다.

4. 결론

이상의 실험결과로서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 경수중에서 실시한 프레팅마멸 실험에서 지르칼로이-4 튜브 재질은 미소진폭에서는 하중의 증가에도 마멸량이 거의 발생되지 않지만, 임계진폭(100 μ m)부터는 진폭이 증가할수록 마멸량이 서서히 증가하고, 진폭 200 μ m와 300 μ m 사이에서는 진폭이 증가할수록 마멸량이 급격히 증가하였

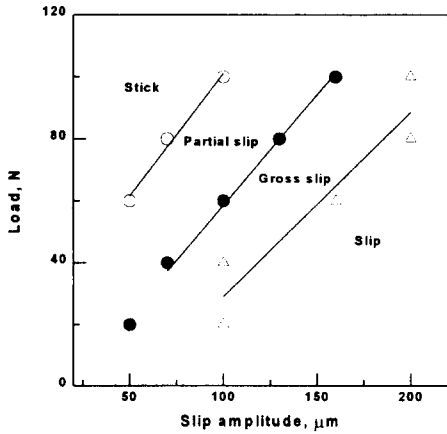


Fig. 10 Fretting map of Zircaloy-4 tube

다.

(2) 진폭 $160\mu\text{m}$ 까지는 접촉하중이 증가될수록 두 시편 사이에 발생하는 stick현상으로 마멸량이 점차 감소하여 일정 하중 이상에서는 마멸량은 무시할 수 있을 정도로 아주 적게 된다. 그러나 진폭 $200\mu\text{m}$ 부터는 하중이 증가할수록 마멸량이 증가한다. 따라서 진폭 $100\mu\text{m}$ 와 $200\mu\text{m}$ 사이에서 하중 변화에 따른 마멸량 변화곡선이 서로 교차하게 된다.

(3) 진동수 증가는 미끄럼거리의 증가로 마멸량이 진동수에 거의 비례하여 증가하였다.

(4) 비마멸율(specific wear rate)은 전 진폭 구간에서 진폭과 하중의 증가에 따라 완만하게 증가하였으나, 진폭 $200\mu\text{m}$ 이하에서는 하중에 따라서 그 진폭구간이 다소 다르지만 비마멸율이 급격히 증가하는 구간이 있다. 급격히 증가하는 이 구간은 gross slip과 slip 영역의 중간에 나타나는 gross slip 영역이다.

(5) Fretting map은 하중과 진폭에 크게 영향을 받지만 일정 진폭($200\mu\text{m}$) 이상에서는 stick현상이 발생되지 않았다.

후기

이 논문은 1997년도 한국학술진흥재단 자유공모과제(1997-001-E00049) 연구결과의 일부이며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

[1]T.H.Kim, K.H.Cho, S.S.Kim, Fretting Wear Characteristics of Zircaloy-4 Tube, Wear, 1998.

[2]A.Iwabuchi, The Effects of Slip Amplitude and Load in Fretting Wear, Japanese Society of Mechanical Engineers, pp.44~378, pp.692~699

[3]J.S.Halliday and W.Hirst, The Fretting Corrosion of Mild Steel, Proc. Roy. Soc. Lond., Ser.A, 236(1956), pp.411~425

[4]Feng, I.Ming and Uhlig H.H., J. Appl. Mech., 21(1954), p.395

[5]Uhlig H. H., ASTM, Spec. Tech. Pub., No. 144(1953), p.77

[6]P. L. Ko, Experimental Studies of Tube Frettings in S/G and Heat Ex., Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 101(1979. 5), pp.125~133

[7]K.L.Johnson, Contact Mechanics, Cambridge University Press, p.84~95.

[8]S. Fouvry, Ph. Kapsa, L. Vincent, Analysis of Sliding Behaviour for fretting Loading : Determination of Transition Criteria, Wear, 185 (1995), pp.35~46

[9]Yoshiyuki Saito and Kazuaki Mino, Elevated Temp. Wear Maps of X40 and

Mar-M247 Alloys, Transactions of the ASME Vol.117, July 1995, pp.524~528.

[10]J.M.Voisin, A.B.Vannes and L.Vincent, Analysis of a Tube-grid Oscillatory Contact, Wear, 181-183(1995), pp.826~832

[11]영광 원자력발전소 3,4호기 최종안전 분석보고서(YGN 3,4 FSAR) 제4,2,3조 "Design Evaluation" pp.4.2-54~55

[12]A.Krell and D. Klaffke, Effects of Grain Size and Humidity on Fretting Wear in Fine-Grained Alumina, Al₂O₃/TiC, and zirconia, J. Am. Ceram. Soc., 79[5] 1139-46(1996)

[13]N.J.Fisher, A.B.Chorv, and M.K.Weckwerth, Experimental Fretting Wear Studies of Steam Generator Materials, Transactions of the ASME, Vol. 117, Nov. 1995, pp. 312~320